

日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日 2 0 0 2 年 9 月 1 1 日
Date of Application:

出 願 番 号 特 願 2 0 0 2 - 2 6 5 8 4 2
Application Number:
[ST. 10/C] : [J P 2 0 0 2 - 2 6 5 8 4 2]

出 願 人 株式会社日立ハイテクノロジーズ
Applicant(s):

2 0 0 3 年 9 月 2 6 日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

今 井 康 夫



出証番号 出証特 2 0 0 3 - 3 0 7 9 6 3 6

【書類名】 特許願

【整理番号】 A200879

【提出日】 平成14年 9月11日

【あて先】 特許庁長官 殿

【国際特許分類】 H01J 37/147

【発明者】

【住所又は居所】 茨城県ひたちなか市大字市毛 8 8 2 番地 株式会社 日立ハイテクノロジーズ 那珂事業所内

【氏名】 佐藤 貢

【発明者】

【住所又は居所】 茨城県ひたちなか市大字市毛 8 8 2 番地 株式会社 日立ハイテクノロジーズ 那珂事業所内

【氏名】 戸所 秀男

【特許出願人】

【識別番号】 501387839

【氏名又は名称】 株式会社 日立ハイテクノロジーズ

【代理人】

【識別番号】 100091096

【弁理士】

【氏名又は名称】 平木 祐輔

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 015244

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 荷電粒子線装置

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

荷電粒子源と、当該荷電粒子源から放出される荷電粒子線を集束して試料上で走査する荷電粒子光学系を備えた荷電粒子線装置において、

対物レンズを含む、少なくとも 2 段の集束レンズに対して荷電粒子線の入射位置を制御可能な光軸制御手段を備え、対物レンズと他のレンズで作る軸外色収差が互いにキャンセルされるように、当該光軸制御手段により荷電粒子線の入射位置を制御することを特徴とする荷電粒子線装置。

【請求項 2】

荷電粒子源と、当該荷電粒子源から放出される荷電粒子線を集束して試料上で走査する荷電粒子光学系を備えた荷電粒子線装置において、

対物レンズを含む、少なくとも 2 段の集束レンズに対して荷電粒子線の入射位置を制御可能な光軸制御手段を備え、対物レンズと他のレンズで作るコマ収差が互いにキャンセルされるように、当該光軸制御手段により荷電粒子線の入射位置を制御することを特徴とする荷電粒子線装置。

【請求項 3】

荷電粒子源と、当該荷電粒子源から放出される荷電粒子線を集束して試料上で走査する荷電粒子光学系を備えた荷電粒子線装置において、

対物レンズを含む、少なくとも 2 段の集束レンズに対して荷電粒子線の入射位置を制御可能な光軸制御手段と、複数の集束レンズをそれぞれ独立に制御するためのレンズ制御手段とを備え、対物レンズと他のレンズで作る軸外色収差及びコマ収差が互いにキャンセルされるように、前記レンズ制御手段により複数の集束レンズを制御し、前記光軸制御手段により荷電粒子線の入射位置を制御することを特徴とする荷電粒子線装置。

【請求項 4】

請求項 1, 2 又は 3 記載の荷電粒子線装置において、前記荷電粒子線を観察試料に対して光軸から傾斜して照射することを特徴とする荷電粒子線装置。

【請求項 5】

請求項 4 記載の荷電粒子線装置において、非点収差補正手段を有し、前記荷電粒子線の傾斜角度に連動して前記非点収差補正手段を制御することを特徴とする荷電粒子線装置。

【請求項 6】

請求項 4 又は 5 記載の荷電粒子線装置において、前記荷電粒子線の傾斜角度に連動して、前記対物レンズの焦点距離を制御することを特徴とする荷電粒子線装置。

【請求項 7】

請求項 4, 5 又は 6 記載の荷電粒子線装置において、前記荷電粒子線の傾斜角度に連動して、試料に対する前記荷電粒子線の照射位置のずれを補正することを特徴とする荷電粒子線装置。

【請求項 8】

請求項 1, 2 又は 3 記載の荷電粒子線装置において、対物レンズ以外のレンズとして、相対的に孔径及びギャップが大きな磁極を有する第 1 のレンズと相対的に孔径及びギャップが小さな磁極を有する第 2 のレンズとを組み合わせた集束レンズを備え、前記荷電粒子線を観察試料に対して光軸に平行に照射する時は前記第 1 のレンズを励磁して前記第 2 のレンズをオフにし、前記荷電粒子線を観察試料に対して光軸から傾斜して照射する時は前記第 1 のレンズをオフにして前記第 2 のレンズを励磁することを特徴とする荷電粒子線装置。

【発明の詳細な説明】**【0 0 0 1】****【発明の属する技術分野】**

本発明は、電子線やイオン線等の荷電粒子線を用いる荷電粒子線装置に係り、特に、試料上で荷電粒子線を傾斜した場合にも分解能の劣化を抑えて高分解能像を得るのに好適な荷電粒子線装置に関する。

【0 0 0 2】**【従来の技術】**

走査電子顕微鏡に代表される荷電粒子線装置では、細く集束された荷電粒子線

を試料上で走査して試料から所望の情報（例えば試料像）を得る。このような荷電粒子線装置では、年々高分解能化が進むと同時に、近年では試料に対して荷電粒子線を傾斜させて試料の傾斜像を得ることが必要とされている。試料の傾斜像を得るには試料ステージを傾斜させるのが一般的であるが、高倍率での視野ずれを防止したり、より高速に試料傾斜像を得るには、試料ステージを機械的に傾斜するよりも荷電粒子線を試料に対して傾斜するほうが合理的であることがその理由である。

【0003】

装置の高分解能条件を維持して荷電粒子線を傾斜させる技術として、実開昭55-48610号公報および特開平2-33843号公報に、荷電粒子線を対物レンズの軸外に入射させて、対物レンズの集束作用（振り戻し作用）を利用する方法が開示されている。また、特開2000-348658号公報には、荷電粒子線を対物レンズの集束磁界内で互いに逆向きに偏向させる2段の偏向手段を設け、荷電粒子線を対物レンズ軸外で傾斜したときに発生する軸外色収差を補正する技術が開示されている。特開2001-15055号公報には、荷電粒子線を対物レンズの軸外に通すための偏向手段を対物レンズよりも電子源側に設け、対物レンズの軸外で発生する色収差（軸外色収差）を対物レンズよりも電子源側に設けたウィーンフィルタで補正することにより、荷電粒子線を傾斜したときの分解能劣化を低減する技術が開示されている。さらに、WO 01/33603には、光軸と直交する任意の2次元方向に直交電磁界を発生させるウィーンフィルタを対物レンズよりも電子源側の光軸上に配置して、任意方向の軸外色収差を補正する技術が開示されている。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】

特開2000-348658号公報に記載されている、対物レンズの磁界内で荷電粒子線を2段偏向させる方法は、近年一般的になっている対物レンズ磁場を試料側に漏洩させて高分解能を得る方式に対しては、2段の偏向手段を配置すべき空間が対物レンズ磁極と試料との間になるため、対物レンズ磁極と試料との距離を大きくする必要が生じて高分解能が得られなくなる問題がある。このために、特開2000-348658号公報では、対物レンズの磁極を4個設けて、高分解能観察用と荷電粒

子線傾斜用とで磁極の組み合わせを切り替える技術を示しているが、この方法においては、磁極の数が増える分だけ磁極間の軸ずれや切り替えたときの諸問題（倍率ずれ、軸ずれ、走査条件の変化など）を解決する必要があり、実用面での困難が伴う問題がある。

【0005】

一般に、対物レンズの軸外の性質を利用して荷電粒子線を傾斜する場合には軸外色収差だけでなくコマ収差も発生し、低加速電圧時には軸外色収差が支配的であるが、比較的高い加速電圧を使用する場合には、軸外色収差よりもむしろコマ収差が問題となる。したがって、比較的高い加速電圧ではコマ収差を除去することが重要になる。また、低加速電圧であっても、荷電粒子線の傾斜角度を大きくするとコマ収差が大きくなるため、軸外色収差を補正しても高分解能が得られない。したがって、荷電粒子線を高角度に傾斜させて高分解能像を得るには、軸外色収差とコマ収差を同時に補正する必要があるが、特開2000-348658号公報に記載されている従来技術ではこの点の配慮がなされておらず、高角度傾斜時に分解能が低下する問題がある。

【0006】

一方、特開2001-15055号公報に記載の技術では、荷電粒子線を対物レンズの軸外に入射させたときに発生する軸外色収差をウィーンフィルタで補正しているが、ウィーンフィルタではコマ収差の除去ができないため、高角度な荷電粒子線の傾斜、あるいは、比較的高加速電圧に対する荷電粒子線の傾斜においては、分解能が低下する問題がある。

【0007】

対物レンズの振り戻し作用を利用して荷電粒子線（ビーム）を試料上で傾斜するときに発生する収差について、図2により説明する。ビーム4をビーム傾斜角制御コイル51により対物レンズ7の物点で偏向して対物レンズ7の軸外に入射させると、対物レンズ7の集束作用によりビーム4が試料10上で傾斜する。この場合、対物レンズ7から見た物点位置が移動していないため、ビームを傾斜しても視野が移動しない。ビームを傾斜したときの視野ずれを補正すると、ビームは原理的に図2に示す偏向条件を満たすことになる。

【0008】

物点が光軸上にあるときに発生する対物レンズの収差は、球面収差と軸上色収差である。このとき、対物レンズで発生する収差 (Δw_i) は、試料上での軌道勾配 (w'_i) の関数として次の多項式(1)で表現される。なお、軌道勾配は、軌道関数 w ($w = x + j \cdot y$: j は複素数の虚数単位) の光軸 z に関する微分で表し、本明細書では z に関する微分をダッシュ「'」で表す。

【0009】

【数1】

$$\Delta w_i = C_{si} \cdot w'_i \cdot w'_i \cdot \bar{w}'_i + C_{ci} \cdot \varepsilon_i \cdot w'_i \quad \dots(1)$$

ここで、

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta V}{V_i} \quad \dots(2)$$

Δw_i : 像面での収差

w'_i : 像面での軌道の傾き

\bar{w}'_i : w'_i の複素共役

C_{si} : 像面での球面収差係数

C_{ci} : 像面での軸上色収差係数

ΔV : ビームエネルギーのばらつき

V_i : 像面でのビームエネルギー

である。

【0010】

対物レンズの振り戻し作用によりビームを傾斜した場合、試料上での軌道勾配 (w'_i) は、ビーム傾斜角度に対応する軌道勾配 (w'_t) とビーム開き角に関連する軌道勾配 (w'_f) の和として、次のように書ける。

【0011】

【数2】

$$w'_i = w'_t + w'_f \quad \dots(3)$$

$$\bar{w}'_i = \bar{w}'_t + \bar{w}'_f \quad \dots(4)$$

【0012】

試料上での軌道勾配座標系 (w'_i -座標系) でビームの状況を表した模式図を図3に示す。図3の横軸は像面上におけるX方向の軌道の傾きを表し、縦軸はY方向の軌道の傾きを表す。軌道の勾配は z に関する微分で表されるため、先に述べたようにダッシュ「'」をつけた記述になっている。図3に示す円形図形(ビーム領域)は、一次ビームがレンズの集束作用によって種々の勾配を持つ軌道の集合として表されるため、この集合の領域を表している。図3において、ビームの集束軌道の中心がビーム傾斜 (w'_t) に対応するため、この分だけ円形図形が (x'_i, y'_i) の座標系の中心からずれている。ビーム傾斜時の収差は、式(1)に式(3), (4)を代入して式(5) のように得られる。

【0013】

【数3】

$$\Delta w_i = C_{si} \cdot (w'_i + w'_f) \cdot (w'_i + w'_f) \cdot (\bar{w}'_i + \bar{w}'_f) + C_{ci} \cdot \varepsilon_i \cdot (w'_i + w'_f) \quad \dots(5)$$

【0014】

式(5)を展開すると、式(6)となり、本来は軸上収差のみの系からビーム傾斜(軌道の離軸)によってサイデル収差(球面収差、コマ収差、非点収差、像面湾曲収差、歪曲収差)と軸上色収差、軸外色収差が発生することがわかる。

【0015】

【数4】

$$\begin{aligned} \Delta w_i = C_{si} \cdot (w'_f w'_f \bar{w}'_f + \bar{w}'_i w'_f w'_f + 2w'_i w'_f \bar{w}'_f + 2w'_i \bar{w}'_i w'_f + w'_i w'_i \bar{w}'_f + w'_i w'_i \bar{w}'_i) \\ + C_{ci} \cdot \varepsilon_i \cdot (w'_i + w'_f) \quad \dots(6) \end{aligned}$$

これらの収差を以下に項目別に列挙する。

【0016】

【数 5】

$$\begin{aligned}
C_{si} \cdot w'_f \cdot w'_f \cdot \bar{w}'_f & \quad (7): \text{球面収差} \\
C_{si} \cdot (\bar{w}'_f \cdot w'_f \cdot w'_f + 2w'_i \cdot w'_f \cdot \bar{w}'_f) & \quad (8): \text{コマ収差} \\
C_{si} \cdot (w'_i \cdot w'_i \cdot \bar{w}'_f + 2w'_i \bar{w}'_i w'_f) & \quad (9): \text{非点収差+像面湾曲収差} \\
C_{si} \cdot w'_i \cdot w'_i \cdot \bar{w}'_i & \quad (10): \text{歪曲収差} \\
C_{ci} \cdot \varepsilon_i \cdot w'_i & \quad (11): \text{軸外色収差} \\
C_{ci} \cdot \varepsilon_i \cdot w'_f & \quad (12): \text{軸上色収差}
\end{aligned}$$

【0017】

上記した項目のなかで、 w'_t を含む項がビーム傾斜で発生する収差であり、コマ収差、非点収差、像面湾曲収差、歪曲収差、軸外色収差が該当するが、ビーム集束角度 (w'_f)、およびエネルギー幅 ΔV の関数 ε_i を含む収差のみ (コマ収差、非点収差、像面湾曲収差、軸外色収差) がビーム傾斜時の分解能低下を起こす。

【0018】

ビーム傾斜時に分解能を低下させる収差のなかで、非点収差は通常用いられている非点補正コイルにより容易に補正できる。また、像面湾曲収差はビーム傾斜によるフォーカスずれのため、フォーカス条件 (対物レンズ電流) を補正すれば消すことができる。さらに、歪曲収差は、ビーム傾斜による照射位置のずれのため、ビーム傾斜に連動して照射位置を補正すれば消すことができる。したがって、最終的に考慮すべき収差は軸外色収差とコマ収差であり、どちらもビーム傾斜角 (w'_t) に比例して増大する。

【0019】

本発明の目的は、上述した軸外色収差とコマ収差を実用的に容易な方法により除去して、分解能の低下を抑えた高角度ビーム傾斜が可能な荷電粒子線装置を提供することにある。

【0020】

【課題を解決するための手段】

上記目的を達成するため、対物レンズを含む少なくとも2段以上の集束レンズを配置し、各々のレンズ軸外にビームを入射させる偏向手段を設け、各レンズで

発生した軸外収差（軸外色収差及び／又はコマ収差）が互いにキャンセルするように、すなわち各レンズで発生した軸外収差の総和がゼロになるようにした。また、ビーム傾斜角度に連動して非点収差を制御する手段を設けて、ビーム傾斜角によって変化する非点収差の補正を可能にした。ビーム傾斜角に連動して対物レンズの焦点距離を制御するのも有効である。さらに、ビーム傾斜角に連動して照射位置のずれを補正することも可能にした。

【0021】

【発明の実施の形態】

以下、図面を用いて本発明の実施の形態を説明する。以下の図において、同じ機能部分には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。

図1は、本発明の一例である走査電子顕微鏡の概略構成図である。陰極1と第一陽極2の間には、コンピュータ40で制御される高圧制御電源20により電圧が印加され、所定のエミッション電流で一次電子線4が陰極1から引き出される。陰極1と第二陽極3の間には、コンピュータ40で制御される高圧制御電源20により加速電圧が印加され、陰極1から放出された一次電子線4が加速されて後段のレンズ系に進行する。一次電子線4は、レンズ制御電源21で制御された集束レンズ5で集束され、絞り板8で一次電子線の不要な領域が除去された後に、レンズ制御電源22で制御された集束レンズ6、および対物レンズ制御電源23で制御された対物レンズ7により、試料10に微小スポットとして集束される。対物レンズ7は、インレンズ方式、アウトレンズ方式、およびシュノーケル方式（セミインレンズ方式）など、種々の形態をとることができる。また、試料に負の電圧を印加して一次電子線を減速させるリターディング方式も可能である。さらに、各々のレンズは、複数の電極で構成される静電型レンズで構成してもよい。

【0022】

一次電子線4は、走査コイル制御電源によって制御される走査コイル9で試料10上を二次元的に走査される。一次電子線の照射で試料10から発生した二次電子等の二次信号12は、対物レンズ7の上部に進行した後、二次信号分離用の直交電磁界発生装置11により、一次電子と分離されて二次信号検出器13に検

出される。二次信号検出器 13 で検出された信号は、信号増幅器 14 で増幅された後、画像メモリ 25 に転送されて像表示装置 26 に試料像として表示される。

【0023】

走査コイル 9 と同じ位置に 2 段の偏向コイル 51 が配置されており、傾斜制御電源 31 によって対物レンズの物点が偏向支点となるように、対物レンズに入射する一次電子線 4 の位置を二次元的に制御できる。集束レンズ 6 の付近に非点補正コイル 53 が配置されており、ビーム傾斜条件に連動して非点補正電源 33 で制御される。集束レンズ 6 と絞り板 8 の間には 2 段の偏向コイル 52 が配置されており、集束レンズ 6 の物点が偏向の支点となるように、収差制御電源 32 によって集束レンズ 6 に入射する一次電子線 4 の位置を二次元的に制御できる。偏向コイル 51 には、対物レンズの物点が偏向支点となる一次電子線位置制御信号に加えて、一次電子線の試料上での照射位置を二次元的に制御できる制御信号も流すことができ、ビーム傾斜条件に連動して照射位置のずれを補正できる。

【0024】

試料ステージ 15 は、試料を少なくとも一次電子線と垂直な面内の 2 方向（X 方向、Y 方向）に試料 10 を移動することができる。入力装置 42 からは、画像の取り込み条件（走査速度、加速電圧など）やビーム傾斜条件（傾斜方向や傾斜角度）の指定、および画像の出力や記憶装置 41 への保存などを指定することができる。

【0025】

〔実施例 1〕

図 1 の構成を有する走査電子顕微鏡により、ビーム傾斜時に発生する軸外色収差を補正するための実施例について、その主要部分を抜粋した図 4 を用いて以下に詳細に説明する。

【0026】

偏向コイル 52（以下、この偏向コイル 52 を収差制御コイルという）により、集束レンズ 6 の物点が偏向支点となるように一次ビーム 4 を偏向すると、ビーム傾斜時と同じ性質の収差を集束レンズ 6 で発生させることができる。集束レンズ 6 の像点（クロスオーバー点）でのビームエネルギーを V_1 とすると、式(2)に対

応するエネルギー幅のパラメータは、次式(13)となる。

【0027】

【数6】

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta V}{V_1} \quad \dots(13)$$

一方、対物レンズの角倍率をMaとすると、収差補正レンズ像点でのビームの集束角 (w'_{f1}) は、式(14) で与えられる。

【0028】

【数7】

$$w'_{f1} = M_a^{-1} \cdot w'_f \quad \dots(14)$$

【0029】

さらに、集束レンズ6のビーム傾斜角(収差補正用)を w'_{t1} とし、対物レンズ7によるビーム傾斜角 w'_t との比をkで表すと、式(15) より、集束レンズ6で発生した収差が最終フォーカス点に現れる量 Δw_1 は、対物レンズの光学倍率をMとすると、式(16) となる。

【0030】

【数8】

$$w'_{t1} = k \cdot w'_t \quad \dots(15)$$

$$\begin{aligned} \Delta w_1 = & M \cdot C_{s1} \cdot \{M_a^{-3} w'_f w'_f \bar{w}'_f + M_a^{-2} k (\bar{w}'_f w'_f w'_f + 2 w'_f w'_f \bar{w}'_f) + M_a^{-1} k^2 (2 w'_f \bar{w}'_f w'_f + w'_f w'_f \bar{w}'_f) + w'_f w'_f \bar{w}'_f\} \\ & + M \cdot k \cdot C_{c1} \cdot \varepsilon_1 \cdot w'_t + M \cdot M_a^{-1} \cdot C_{c1} \cdot \varepsilon_1 \cdot w'_f \quad \dots(16) \end{aligned}$$

これより、対物レンズ7が作る軸外色収差をキャンセルするための集束レンズ6のビーム傾斜条件 (kの条件) は、式(17) より、式(18) となる。

【0031】

【数9】

$$(C_{c1} \cdot \varepsilon_1 + M \cdot k \cdot C_{c1} \cdot \varepsilon_1) \cdot w'_t = 0 \quad \dots(17)$$

$$k = -\frac{C_{c1} \cdot \varepsilon_1}{M \cdot C_{c1} \cdot \varepsilon_1} \quad \dots(18)$$

【0032】

ここで、式(18)の右辺にはマイナスの符号がついているが、図4の構成の場合には、光学倍率 M がマイナスの値となって式(18)の k の値がプラスになる。例えば、式(18)の値が0.2になったとすると、対物レンズ7によるビーム傾斜角度の0.2倍の角度だけ、集束レンズ6でビームを傾斜させればよい。対物レンズ7によるビーム傾斜角度は、偏向コイル51（以下、この偏向コイル51をビーム傾斜角制御コイルという）の電流に比例するため、予めビーム傾斜角制御コイル51の電流と対応する対物レンズ7によるビーム傾斜角度との関係を記憶装置41に登録することでプリセットしておくことができる。また、集束レンズ6によるビーム傾斜角度は、収差制御コイル52の電流に比例するため、収差制御コイル52の電流と集束レンズ6によるビーム傾斜角度の関係を予め記憶装置41に登録する等してプリセットしておくことができる。これらのプリセット条件と式(18)の値により、ビーム傾斜角制御コイル51と収差制御コイル52の電流の比例関係が式(18)の k の値を満たすように、ビーム傾斜角制御電源31と収差制御電源32をコンピュータ40により制御することができる。一方、式(18)の k の符号がマイナスになる場合には、対物レンズでのビーム傾斜の方向と逆向きの方向で集束レンズ6によるビーム傾斜を行うことを意味するため、この場合には、ビーム傾斜角制御コイル51に対する収差補正コイル52の電流が逆極性になる。

一方、コマ収差をキャンセルする条件を求めると、式(19)より式(20)のようになる。

【0033】

【数10】

$$C_{si} + M \cdot M_a^{-2} \cdot k \cdot C_{s1} = 0 \quad \dots(19)$$

$$k = -\frac{M_a^2 \cdot C_{si}}{M \cdot C_{s1}} \quad \dots(20)$$

【0034】

この場合の k の値は、一般には式(18)の k の値と異なるため、式(20)の k の値を選択したときには、式(18)を満足しなくなり、ビーム傾斜に伴って色収差が発生する。これは、対物レンズ7と集束レンズ6の形状が異なるために、対物レンズ7でビームを傾斜したときに発生する色収差とコマ収差の大きさの比が、集束

レンズ6でビームを傾斜したときに発生する色収差とコマ収差の大きさの比に一致しないことによる。

【0035】

本実施例では、例えば、加速電圧5 kV以下の低加速電圧において軸外色収差が支配的の場合には、式(18)の条件を満たすようにビーム傾斜角制御コイル51と収差制御コイル52を連動して制御する。また、加速電圧が5 kVを超える条件ではコマ収差が支配的となるため、式(20)を満たすようにビーム傾斜角制御コイル51と収差制御コイル52を連動して制御する。なお、色収差支配かコマ収差支配かの境界を決める加速電圧は対物レンズの球面収差係数と軸上色収差係数、および一次電子線のエネルギー幅に依存するため、この境となる加速電圧は5 kVに限定されるものではない。収差制御コイル52の最適制御条件は、ビーム傾斜角度に比例するため、本実施例では、予め特定のビーム傾斜角度に対して適切な条件をプリセットし、この値から、任意のビーム傾斜角に対する制御条件を計算してビーム傾斜角制御コイル51と収差制御コイル52の連動条件を決めて、各コイルの制御を行う。

【0036】

〔実施例2〕

ビーム傾斜時に軸外色収差とコマ収差が同程度に影響する場合、あるいは、ビーム傾斜角度が例えば5°以上と大きい場合には、軸外色収差とコマ収差とを同時に補正する必要がある。

【0037】

軸外色収差とコマ収差とを同時に補正するには、式(18)と式(20)が同じkの値になることが必要である。この条件を満たすには、対物レンズの光学倍率（横倍率）を含む条件の設定が必要となる。この条件は、電子光学理論で周知の関係式(21)を用いて、式(22)で与えられる。

【0038】

【数 1 1】

$$M \cdot M_a \cdot \sqrt{\frac{V_i}{V_1}} = 1 \quad \dots(21)$$

$$\frac{C_{cl}}{C_{sl}} = M^2 \cdot \frac{C_{ci}}{C_{si}} \quad \dots(22)$$

【0039】

式(22)は、集束レンズ6の焦点位置を所定の条件にすることで満足させることができる。すなわち、集束レンズ6の焦点位置を対物レンズ側に移動するとMの値が大きくなり、対物レンズから遠ざけるとMの値が小さくなる。したがって、図5に示すように、縦軸に $A (=M^2(C_{ci}/C_{si}) - (C_{cl}/C_{sl}))$ を取り、横軸に集束レンズ6の焦点位置を取ると、 $A=0$ になる焦点位置を見出すことができる。 $A=0$ になる焦点位置は、すなわち、式(22)を満足する条件であるので、この焦点位置を、予めシミュレーションや実験により決定することができる。

式(21)の関係を用いると、収差制御コイル52の最適制御条件を与える式(20)は、式(23)となる。

【0040】

【数 1 2】

$$k = -\frac{C_{si}}{M^3 \cdot C_{sl}} \frac{V_1}{V_i} \quad \dots(23)$$

【0041】

本実施例では、式(21)の関係を満たすように集束レンズ6の励磁条件を設定するとともに、式(23)の関係を満たすようにビーム傾斜角制御コイル51と収差制御コイル52を連動して制御する。

【0042】

図6のフローチャートを用いて、色収差とコマ収差を同時に補正する制御フローを説明する。

最初、式(22)を満たすMの値を実現するための集束レンズ6の焦点位置を予めシミュレーションや実験で求めて記憶装置41に登録する(ステップ11)。次に、式(23)を満たすkの値を予め計算して記憶装置41に登録する。kの値は、

予めシミュレーションや実験で決めた値を使うこともできる（ステップ12）。更に、対物レンズ7によるビーム傾斜角とビーム傾斜角制御コイル51の電流の関係を予めシミュレーションや実験で求めて記憶装置41に登録し（ステップ13）、集束レンズ6によるビーム傾斜角と収差制御コイル52の電流の関係を予めシミュレーションや実験で求めて記憶装置41に登録する（ステップ14）。次に、式(23)を満たす k の値から、ビーム傾斜角制御コイル51と収差制御コイル52の電流の関係を求めて記憶装置41に登録する（ステップ15）。

【0043】

次に、コンピュータ40により、ステップ13で登録した関係とビーム傾斜角からビーム傾斜角制御コイル51の電流を設定し（ステップ16）、ステップ15で登録した関係から、ビーム傾斜角制御コイル51に対応する収差制御コイル52の電流を設定する（ステップ17）。

【0044】

〔実施例3〕

本実施例では、さらに、ビーム傾斜に連動して非点補正コイルと対物レンズ電流を制御する。ビーム傾斜で発生する非点収差は、式(9)から明らかなように、ビーム傾斜角 (w'_t) の2乗に比例して増大する。ビーム傾斜角 (w'_t) は、ビーム傾斜角制御コイル51の電流に比例するため、本実施例では、ビーム傾斜角制御コイル51の電流に対して予め定めた複数の条件に対して、図9に示すように非点収差が補正される非点補正器53の動作条件を記憶装置41に登録するなどしてプリセットしておく。ビーム傾斜によって発生する非点収差は、ビーム傾斜角が0（ビーム傾斜角制御コイル51の電流が0）のときの非点補正量 (I_{sx0} , I_{sy0}) と任意のビーム傾斜角での非点補正量の差で与えられる。よって、ビーム傾斜角制御コイル51の電流 (I_x , I_y) が (0, 0) の条件と、予め定めた電流 (I_{x0} , I_{y0}) の条件における非点収差補正電流を (I_{sx0} , I_{sy0}) at (I_x , I_y)=(0, 0), (I_{sx1} , I_{sy1}) at (I_x , I_y)=(I_{x0} , 0), (I_{sx2} , I_{sy2}) at (I_x , I_y)=(0, I_{y0}), (I_{sx3} , I_{sy3}) at (I_x , I_y)=(I_{x0} , I_{y0})として記憶装置41にプリセットしておき、コンピュータ40は、これらのプリセット値から任意のビーム傾斜角制御コイル51の電流 (I_x , I_y) に対する非点補正コイル53の電流 (I_{sx} , I_{sy}) を、

次のように連動して制御する。

【0045】

【数13】

$$I_{sx} = (I_{sx1} - I_{sx0}) \times \left(\frac{I_x}{I_{x0}} \right)^2 + (I_{sx2} - I_{sx0}) \times \left(\frac{I_y}{I_{y0}} \right)^2 + (I_{sx3} - I_{sx1} - I_{sx2} + I_{sx0}) \times \left(\frac{I_x I_y}{I_{x0} I_{y0}} \right)$$

$$I_{sy} = (I_{sy1} - I_{sy0}) \times \left(\frac{I_x}{I_{x0}} \right)^2 + (I_{sy2} - I_{sy0}) \times \left(\frac{I_y}{I_{y0}} \right)^2 + (I_{sy3} - I_{sy1} - I_{sy2} + I_{sy0}) \times \left(\frac{I_x I_y}{I_{x0} I_{y0}} \right)$$

【0046】

この制御により、ビーム傾斜角制御コイル51の電流を設定してビーム傾斜角を制御しても非点収差が自動的に補正されるように非点補正コイル53が設定される。

【0047】

さらに、ビーム傾斜角制御コイル51の電流 (I_x , I_y) を (0, 0) から (I_{x0} , 0) にしたときのフォーカス電流 (対物レンズ電流) ずれを ΔI_{o1} 、(I_x , I_y) を (0, 0) から (0, I_{y0}) にしたときのフォーカス電流のずれを ΔI_{o2} としてそれぞれ記憶装置41に登録する。コンピュータ40は、これらの登録値を用いて、任意のビーム傾斜角制御コイル51の電流 (I_x , I_y) に対してフォーカス電流の補正值 ΔI_o を次のように連動して制御する。

【0048】

【数14】

$$\Delta I_o = \Delta I_{o1} \left(\frac{I_x}{I_{x0}} \right)^2 + \Delta I_{o2} \left(\frac{I_y}{I_{y0}} \right)^2$$

この制御により、ビーム傾斜角制御コイル51の電流を設定してビーム傾斜角を制御しても、フォーカスのずれが自動的に補正される。

【0049】

〔実施例4〕

図7に、集束レンズ6を2個のレンズで構成した実施例を示す。ビーム傾斜に

より対物レンズで発生したコマ収差をキャンセルする収差を、対物レンズより電子源側の集束レンズで発生させるには、集束レンズの球面収差を大きくする必要がある。何となれば、式(23)で示される通り、集束レンズの球面収差が最終フォーカス点に与える寄与（収差の補正量）が対物レンズの光学倍率（ $M < 1$ ）の3乗に比例して小さくなるためである。そのため、ビーム傾斜時には大きな球面収差が得られるように、磁極孔径とギャップの小さい集束レンズが望ましい。一方で、球面収差が大きいレンズは、高分解能観察に対してはデメリットをもたらす。本実施例では、高分解能に特化した用途とビーム傾斜機能とを両立させるために、球面収差などの幾何収差が小さいレンズ61と逆に幾何収差の大きなレンズ62をペアにしている。

【0050】

本実施例によれば、ビームを傾斜しない用途には高分解能用のレンズ（孔径の大きい磁極を有するレンズ）61を用い、ビームを傾斜する用途には幾何収差の大きなレンズ（孔径とギャップの小さい磁極を有するレンズ）62に切り替えて使用できる。つまり、高分解能観察時には、幾何収差の小さな高分解能用レンズ61を使用し、幾何収差の大きなレンズ62はオフにする。一方、ビーム傾斜時には、幾何収差の大きなレンズ62を用い、高分解能用レンズ61はオフにする。また、収差制御用コイル63に軸ずれ補正用のアライメントコイルとしての機能を兼用させることで、磁極の切り替えに伴う軸ずれを解決できる。

【0051】

以上述べた実施例では、ビーム傾斜で発生する対物レンズの収差を他の一つのレンズで補正する方法を開示したが、対物レンズの収差を補正するのに2個以上の複数のレンズを用いることも可能である。

【0052】

例えば、ビーム傾斜時に発生する色収差を例に複数のレンズで対物レンズの収差を補正する原理について、図8を用いて説明する。対物レンズでビームを傾斜したときに発生する色収差は、ビーム傾斜方向に対応してX成分とY成分が発生する。この収差は、対物レンズに限らず、どのような集束レンズでもビームを傾斜すれば発生するが、その大きさはレンズの磁極形状や動作条件（焦点距離など

）で異なる。そのため、複数のレンズを用いて、それぞれのレンズでビームを傾斜させたときに、それらが作る色収差のベクトルと対物レンズで作る色収差のベクトルの総和（ベクトル和）が図 8 に示すように 0 に戻るようにすれば、対物レンズの色収差が補正されることになる。したがって、補正に用いるレンズは何個でもよく、要は、色収差ベクトルの総和を 0 にすることが重要なのである。コマ収差についても同様に、ビーム傾斜に対応した方向と大きさに収差が発生するため、図 8 に示した図が、そのままコマ収差の補正原理としても当てはまる。

【0053】

以下に、図 10 から図 18 を用いて本発明の他の実施例について説明する。図 10 から図 18 は、対物レンズでビームを傾斜させたときに、対物レンズを含む複数のレンズで発生する収差の総和を 0 にするための軌道制御の例を示す図である。

【0054】

〔実施例 5〕

図 10 は、集束レンズ 6 と絞り 8 との間に偏向器を一個配置したときの軌道制御の例を示す図である。この例では、絞り 8 と集束レンズ 5 の間に配置した 2 段の偏向器からなる収差制御コイル 52 によって、一次電子線 4 が絞り 8 の孔中心で傾斜して通過する条件を作り、絞り 8 と集束レンズ 6 の間に配置した偏向器 521 で、集束レンズ 6 から見た一次電子線 4 の偏向支点が、集束レンズ 5 の集束点 A になるように軌道を制御する。また、集束レンズ 6 の集束点 B はビーム傾斜角制御コイル 51 に一致しており、ビーム傾斜角制御コイル 51 と対物レンズ 7 の動作で一次電子 4 を傾斜させる。

【0055】

〔実施例 6〕

図 11 は、集束レンズ 6 と絞り 8 の間に偏向器が配置できないときの軌道制御の例を示す図である。この例では、集束レンズ 5 と電子源の間に配置した 2 段の偏向器からなる収差制御コイル 52 によって、一次電子線 4 の偏向支点が見かけ上、電子源位置と一致するように一次電子線 4 の軌道を制御する。このとき、集束レンズ 5 で発生した収差は、集束レンズ 6 でその向きが反転するため、対物レ

レンズ 6 で発生する収差をキャンセルするためには、集束レンズ 5 を通過するときの一次電子線 4 の軌道のずれ方向が図 10 の場合と逆向き（収差の向きが逆向き）になる。また、集束レンズ 5 の集束点 A の位置は偏向器 521 の位置（偏向支点）と一致しており、集束点 A を偏向支点として一次電子線 4 の軌道を再び光軸と一致させている。

【0056】

〔実施例 7〕

図 12 は、絞り 8 を集束レンズ 6 と対物レンズ 7 との間に配置したときの軌道制御の例を示す図である。この例では、集束レンズ 6 で対物レンズ 7 の収差を補正することが困難なため、図 11 と同様に集束レンズ 5 によって、一次電子線 4 を傾斜したときに発生する対物レンズの収差を補正するのに必要な収差を発生させる。

【0057】

〔実施例 8〕

図 13 は、2 段のレンズ系を用いて、レンズ間で一旦ビームを集束させて使用する光学系において、収差を補正してビームを傾斜するときの軌道制御の例を示す図である。図 13 の例では、絞り 8 を集束レンズ 5 と電子源の間に配置し、絞り 8 と集束レンズ 5 の間に配置された 2 段の偏向器からなる収差制御コイル 52 により、見かけ上、電子源位置が偏向支点となるようにビームを偏向する。また、集束レンズ 5 によるビーム集束点には、ビーム傾斜角制御コイル 51 が配置され、このビーム傾斜角制御コイル 51 により試料 10 上でのビーム傾斜角を制御する。

【0058】

〔実施例 9〕

図 14 は、2 段のレンズ系を用い、レンズ間の途中でビームを集束させないで使用する光学系において、収差を補正してビームを傾斜するときの軌道制御の例を示す図である。レンズ間の途中でビームが集束しない場合には、集束レンズ 5 で発生した収差の方向が途中で反転しないため、集束レンズ 5 の収差と対物レンズ 7 の収差をキャンセルするために、ビーム傾斜角制御コイル 51 で偏向する方

向と収差制御コイル 52 の偏向方向とが逆向きになる。

【0059】

〔実施例 10〕

図 15 は、図 14 の光学系（途中でクロスオーバを作らない）に対して、絞り 8 の位置を集束レンズ 5 と対物レンズ 7 の途中に配置した実施例を示す図である。この例では、一次電子線 4 が絞り 8 の孔中心を通過するように、絞り 8 の前後にビーム傾斜角制御コイル 51 を配置し、偏向された軌道が絞り 8 の中心を通るようにビーム傾斜角制御コイル 51 を動作させる。

【0060】

〔実施例 11〕

図 16 は、試料 10 に負の電圧（ V_r ）を印加した状態で、一次電子線 4 を対物レンズ 7 で傾斜したときの軌道制御の例を示す図である。試料 10 に負電圧（ V_r ）を印加すると、一次電子線 4 は試料 10 の直前で急激に減速するため、負電圧を印加しない場合に比べて試料上でのビーム傾斜角を大きくすることができる。

【0061】

〔実施例 12〕

図 17 は、薄膜の試料 10 に対物レンズ 7 で傾斜させた一次電子線 4 を照射して、試料 10 を透過した電子 121 を検出する実施例を示す図である。結晶構造を有する薄膜試料の走査透過像（STEM 像）を取得する場合、しばしば、一次電子線の照射方位を試料の結晶方位と対応させることが必要となる。試料の結晶方位は薄膜切片を切り出すときのばらつきで異なるため、結晶方位は任意の方向に数度から 10 度程度のずれを生じる。そのため、試料を機械的に傾斜させて方位合わせを行う方法に比較して、本実施例のように、分解能の低下を抑えて一次電子線を任意に傾斜させることにより、結晶と電子線の方位合わせ操作が極めて簡単になる。薄膜試料 10 より下方には、透過電子 121 を透過電子検出器 131 に対してアライメントするための偏向器 54 が配置され、この偏向器 54 は、一次電子線 4 の傾斜角に連動して制御される。また、図 17 には図示していないが、薄膜試料 10 と透過電子検出器 131 の間に、透過電子の検出角を制限する

手段（レンズや絞りなど）を配置することも可能である。

【0062】

〔実施例 13〕

図 18 は、絞り 8 と対物レンズ 7 との間に 2 個の集束レンズ 6 a, 6 b を配置したときの軌道制御の例を示す図である。この例では、集束レンズ 6 a と 6 b の間に一次電子線 4 の集束点を設け、この集束点の位置に収差制御コイル 5 2 を配置して、集束レンズ 6 b で収差を発生させる。集束レンズ 6 b による一次電子線の焦点位置には、ビーム傾斜角制御コイル 5 1 が配置され、対物レンズ 7 の軸外に一次電子線 4 を入射させてビームを光軸に対して傾斜する。収差制御コイル 5 2 は、対物レンズ 7 で発生した収差が集束レンズ 6 b の収差でキャンセルするように制御される。

【0063】

【発明の効果】

本発明によれば、対物レンズの集束作用を利用したビーム傾斜を行っても、軸外色収差やコマ収差、および非点収差の影響を受けず、高分解能な傾斜観察像を得ることが可能になる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】

本発明の一例である走査電子顕微鏡の概略構成図。

【図 2】

対物レンズの集束作用を利用したビーム傾斜法の原理図。

【図 3】

ビーム傾斜時の軌道勾配の分布を示す図。

【図 4】

ビーム傾斜時の収差を補正する原理図。

【図 5】

色収差とコマ収差を同時に補正するための集束レンズ焦点位置の条件を表す図

。

【図 6】

色収差とコマ収差を同時に補正するビーム傾斜のフローチャート。

【図 7】

4 個の磁極で構成させる集束レンズの構成図。

【図 8】

複数のレンズの作用でビーム傾斜時に発生する対物レンズの色収差を補正する原理を示す図。

【図 9】

ビーム傾斜角制御コイル電流と、ビーム傾斜により発生する非点収差を補正するための非点収差補正コイル電流の関係を表す図。

【図 1 0】

対物レンズの収差を補正するための軌道制御の例を示す図。

【図 1 1】

対物レンズの収差を補正するための軌道制御の例を示す図。

【図 1 2】

対物レンズの収差を補正するための軌道制御の例を示す図。

【図 1 3】

2 段のレンズ系において、途中にビームのクロスオーバ（集束点）を作ってビームを傾斜するときの軌道制御の例を示す図。

【図 1 4】

2 段のレンズ系において、途中にビームのクロスオーバ（集束点）を作らないでビームを傾斜するときの軌道制御の例を示す図。

【図 1 5】

2 段のレンズ系において、絞り板が 2 段レンズの間に配置され、途中にビームのクロスオーバ（集束点）を作らないでビームを傾斜するときの軌道制御の例を示す図。

【図 1 6】

試料に負の電圧を印加して、対物レンズにより一次電子線を傾斜させるときの軌道制御の例を示す図。

【図 1 7】

薄膜試料に対物レンズで傾斜させたビームを照射して、走査透過像（STEM 像）を得る実施例を示す図。

【図 18】

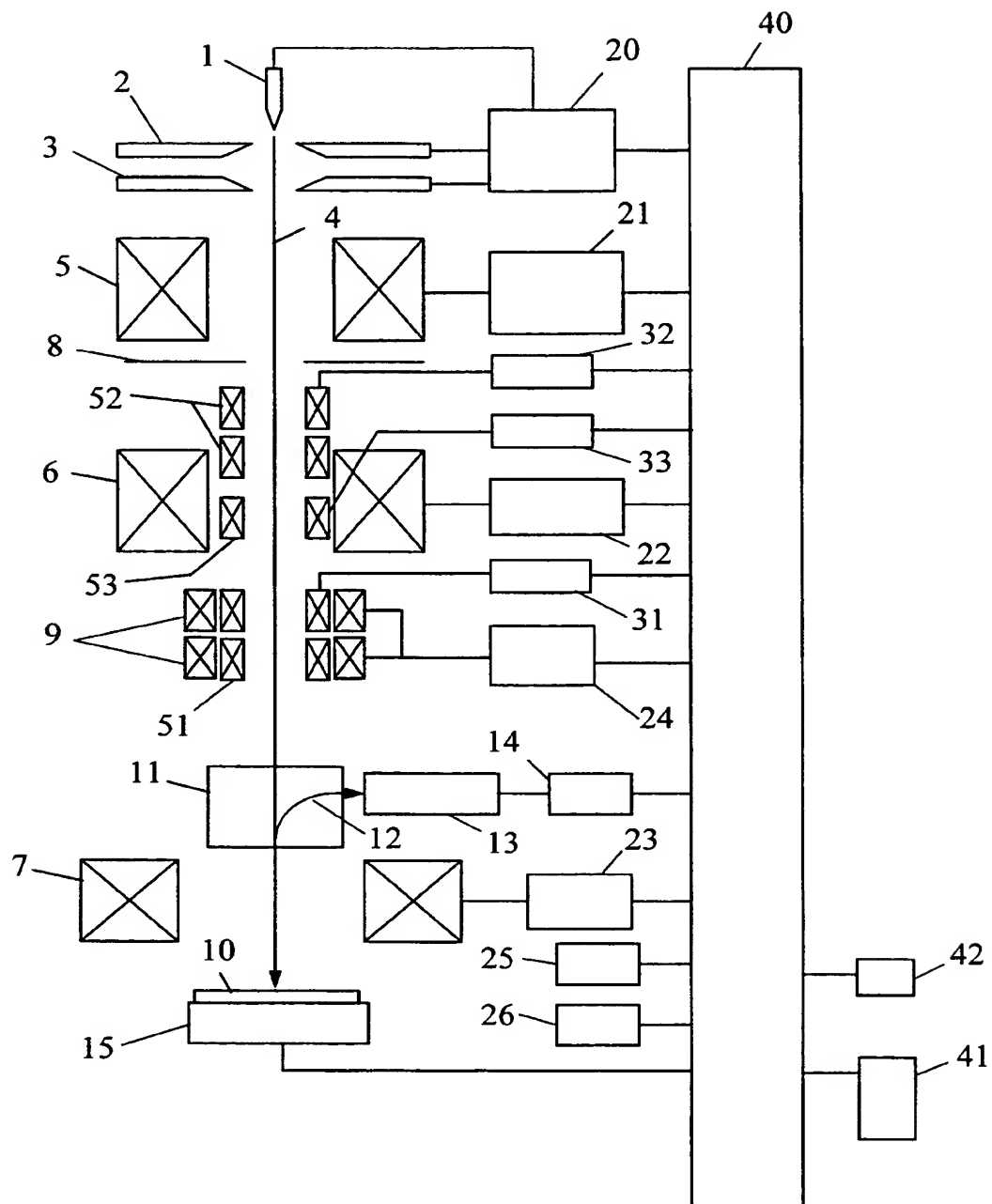
絞りと対物レンズとの間に 2 個の集束レンズを配置したときの軌道制御の例を示す図。

【符号の説明】

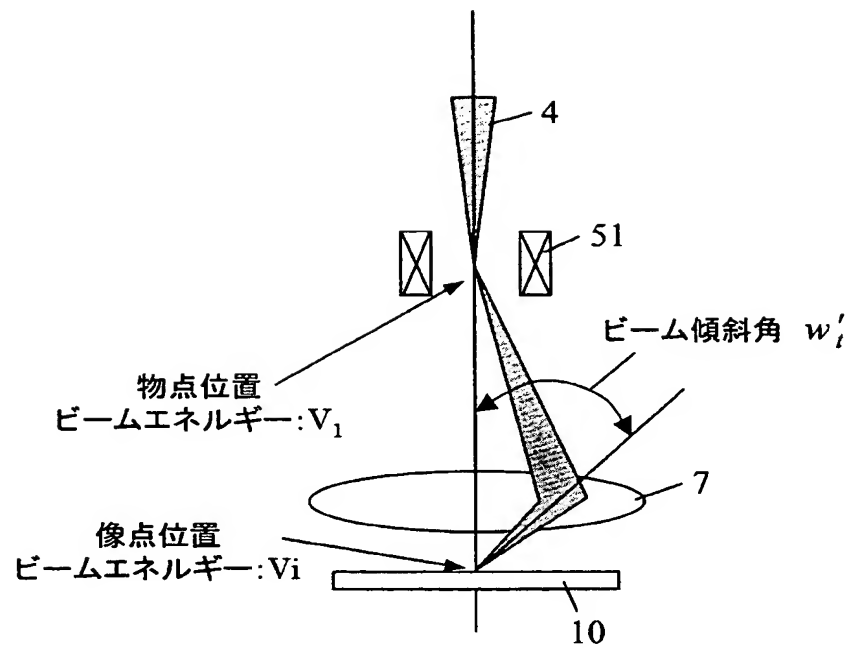
1…陰極、2…第一陽極、3…第二陽極、4…一次電子線、5…第一集束レンズ、6…第二集束レンズ、7…対物レンズ、8…絞り板、9…走査コイル、10…試料、11…二次信号分離用直交電磁界（ $E \times B$ ）発生器、12…二次信号、13…二次信号用検出器、14…信号増幅器、15…試料ステージ、20…高圧制御電源、21…第一集束レンズ制御電源、22…第二集束レンズ制御電源、23…対物レンズ制御電源、24…走査コイル制御電源、25…画像メモリ、26…像表示装置、31…ビーム傾斜角制御電源、32…収差制御電源、33…非点補正電源、40…コンピュータ、41…記憶装置、42…入力装置、51…ビーム傾斜角制御コイル、52…収差制御コイル、53…非点収差補正コイル、54…偏向器、61…高分解能用レンズ、62…ビーム傾斜用（収差補正用）レンズ、63…アライメント兼用収差制御用偏向器、121…透過電子、131…透過電子検出器、521…偏向器

【書類名】 図面

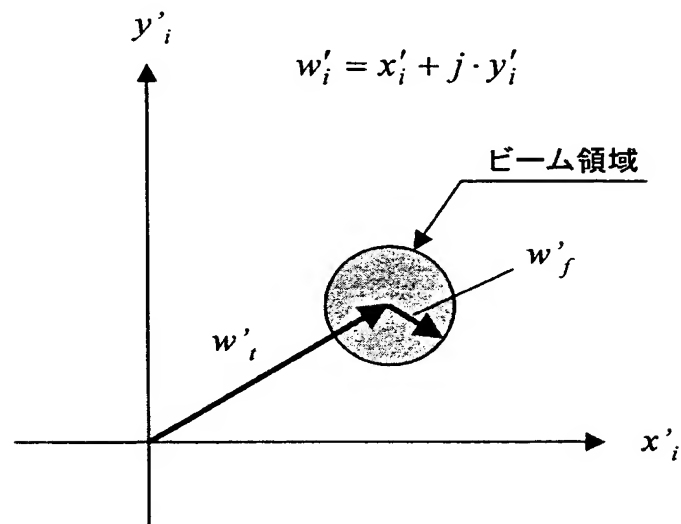
【図 1】



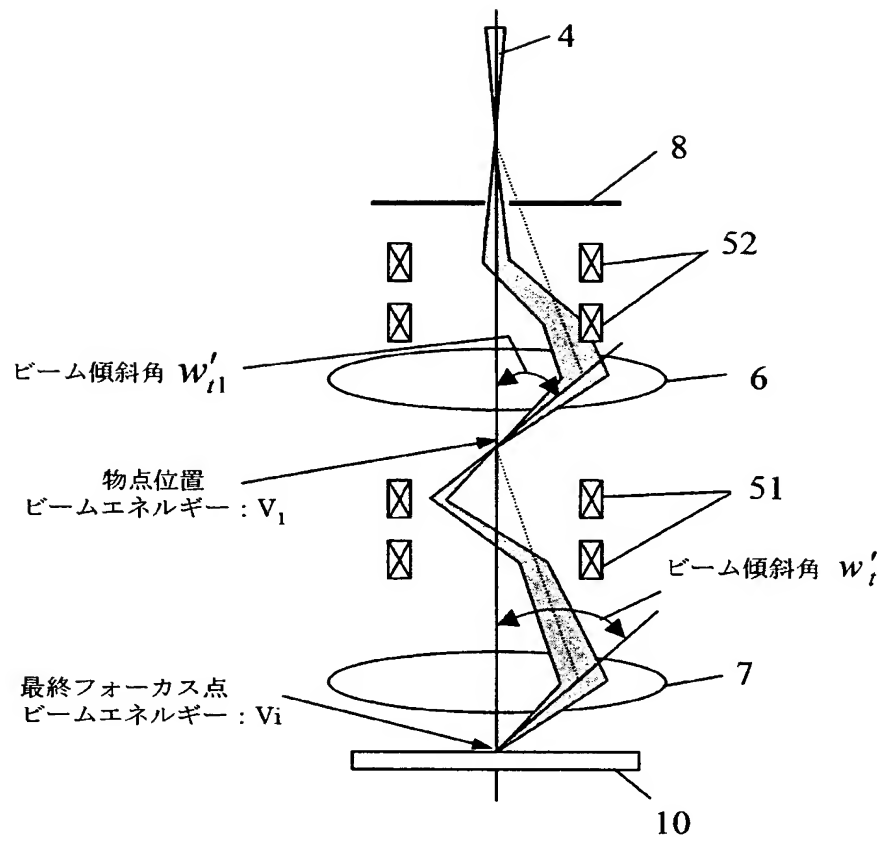
【図 2】



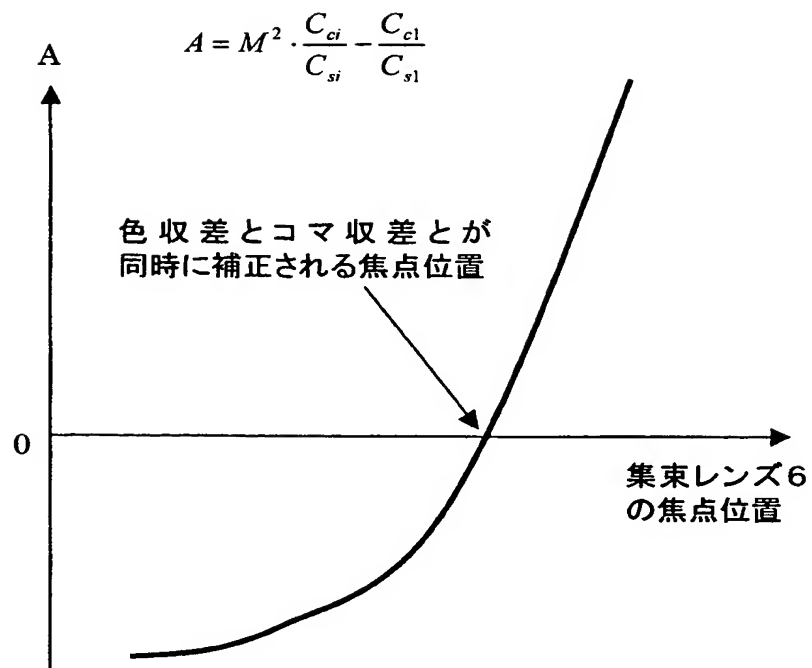
【図 3】



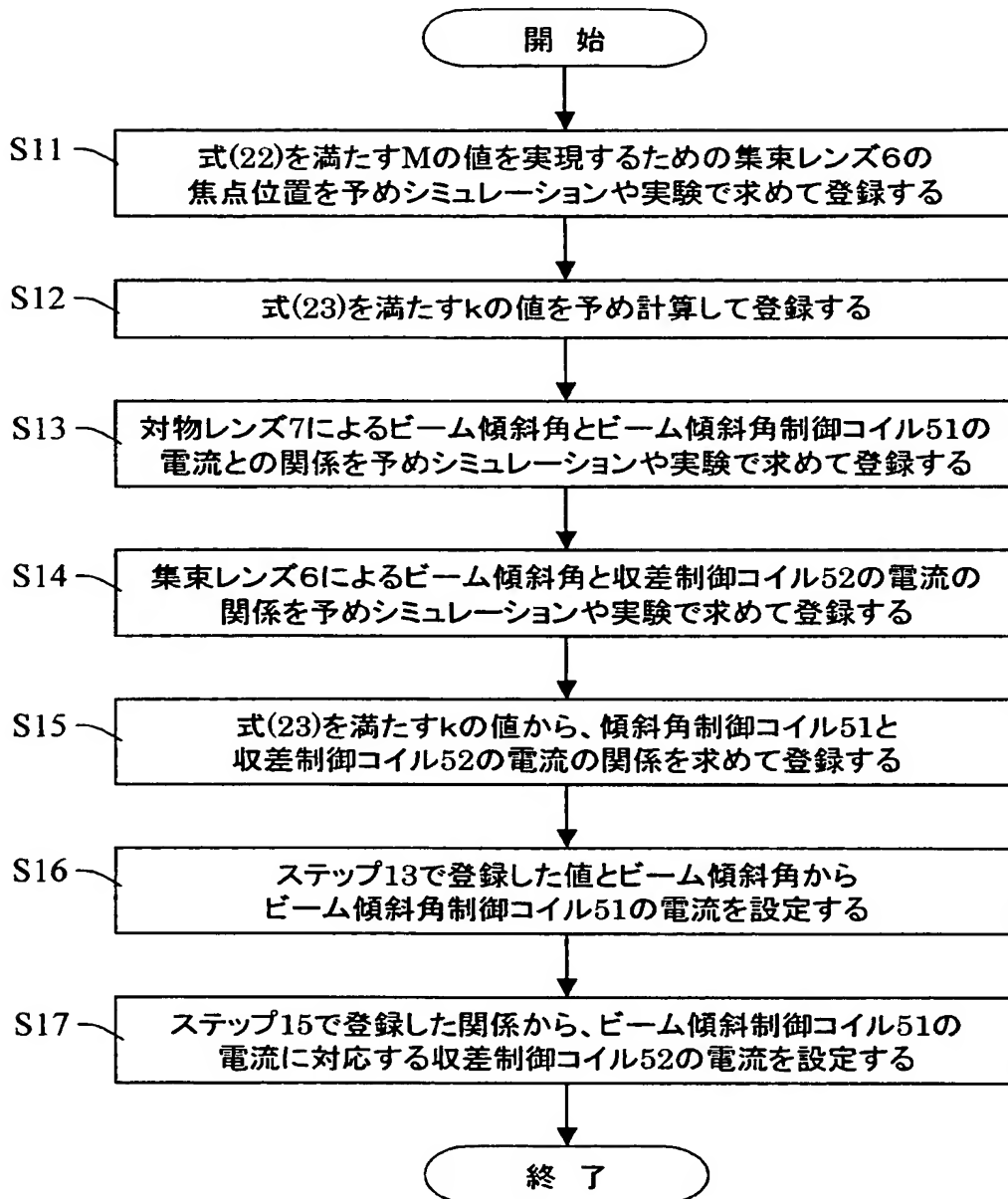
【図 4】



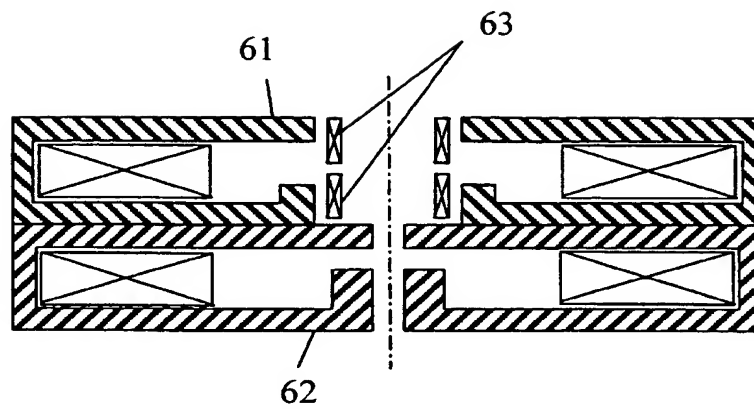
【図 5】



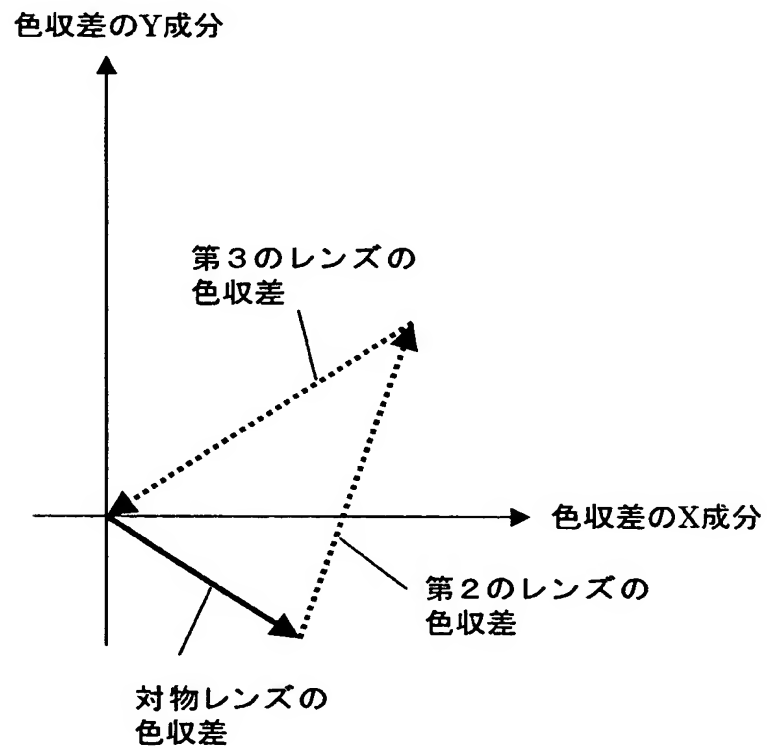
【図 6】



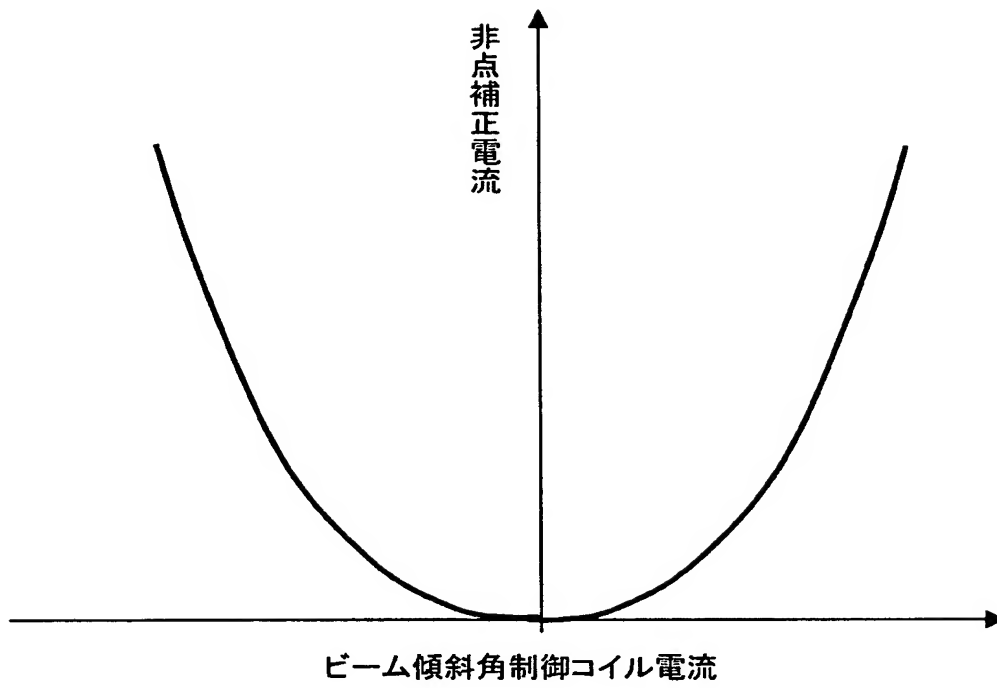
【図 7】



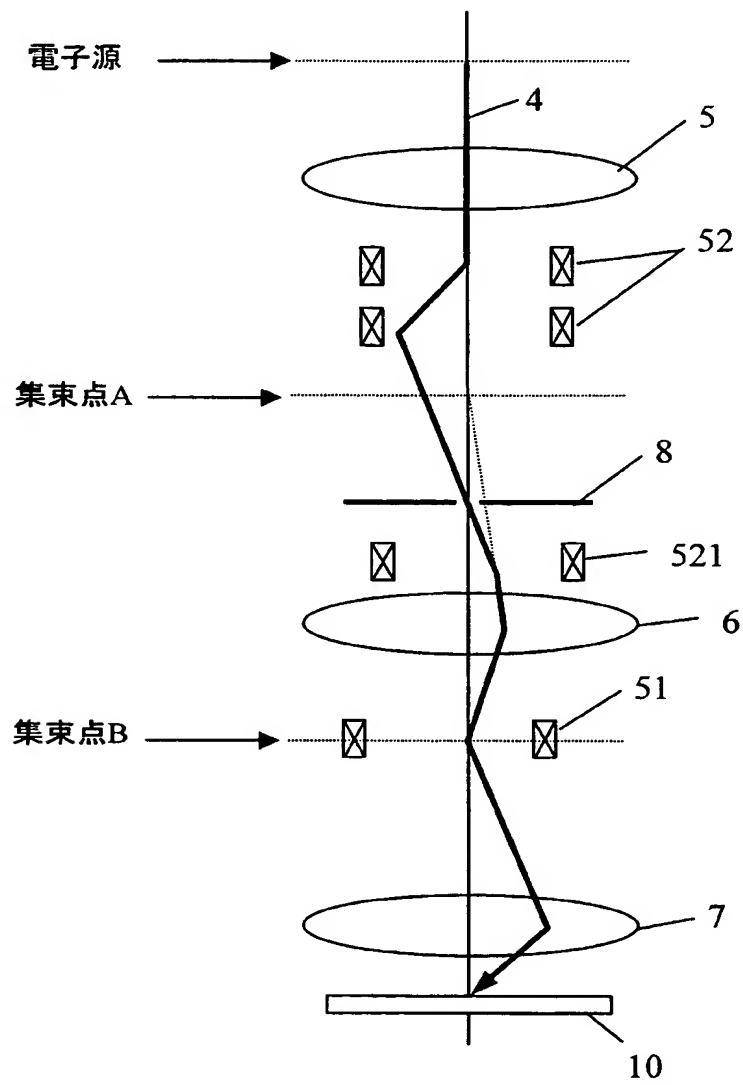
【図 8】



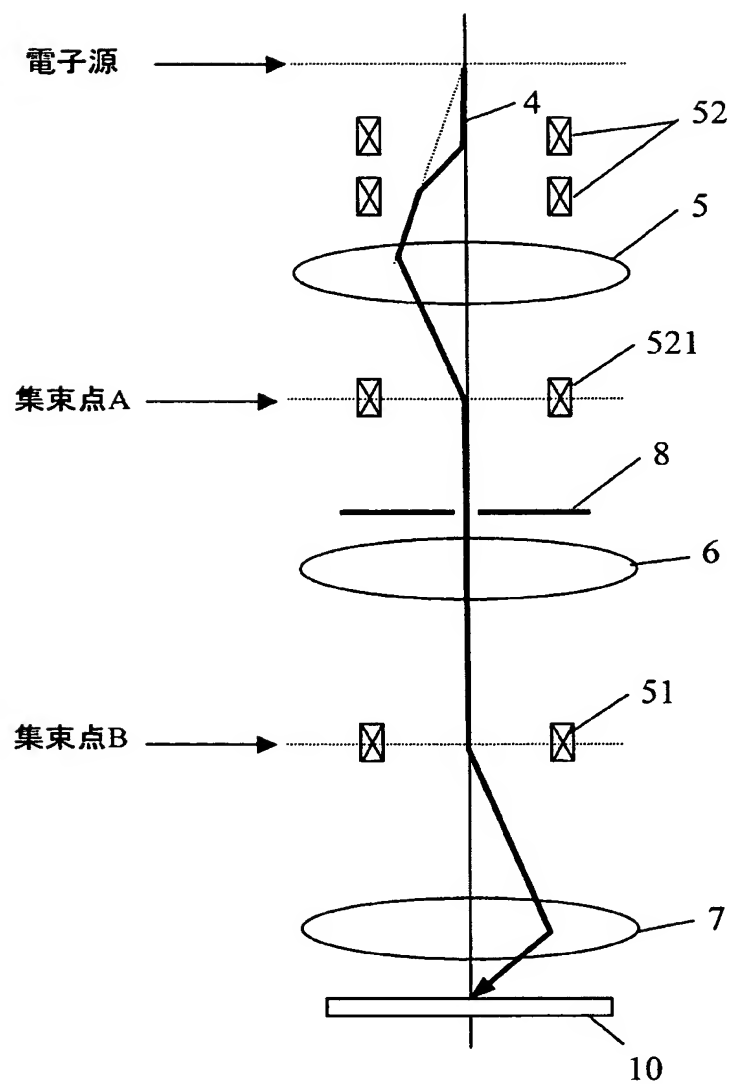
【図 9】



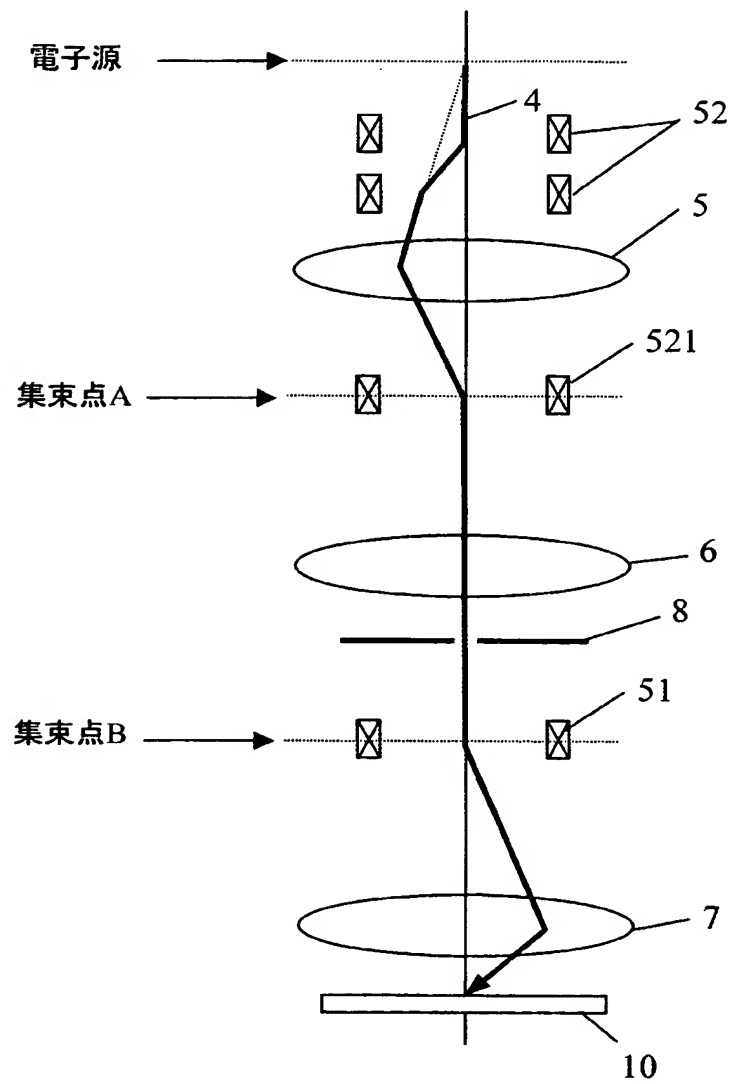
【図 10】



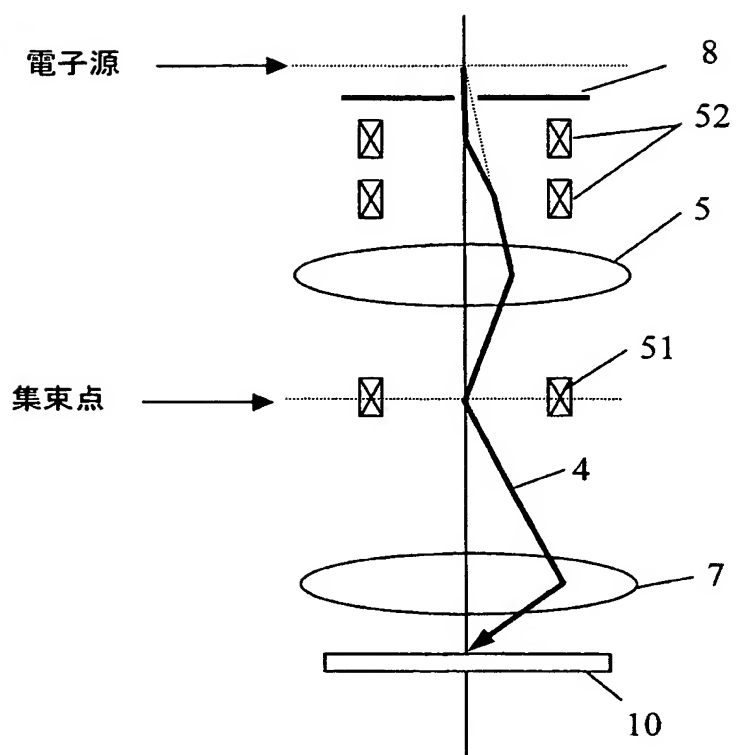
【図 11】



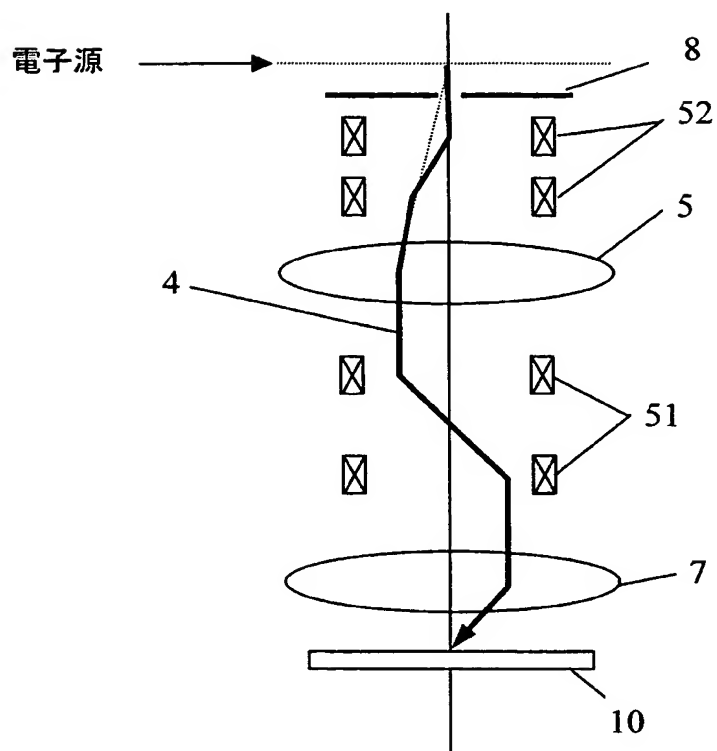
【図 12】



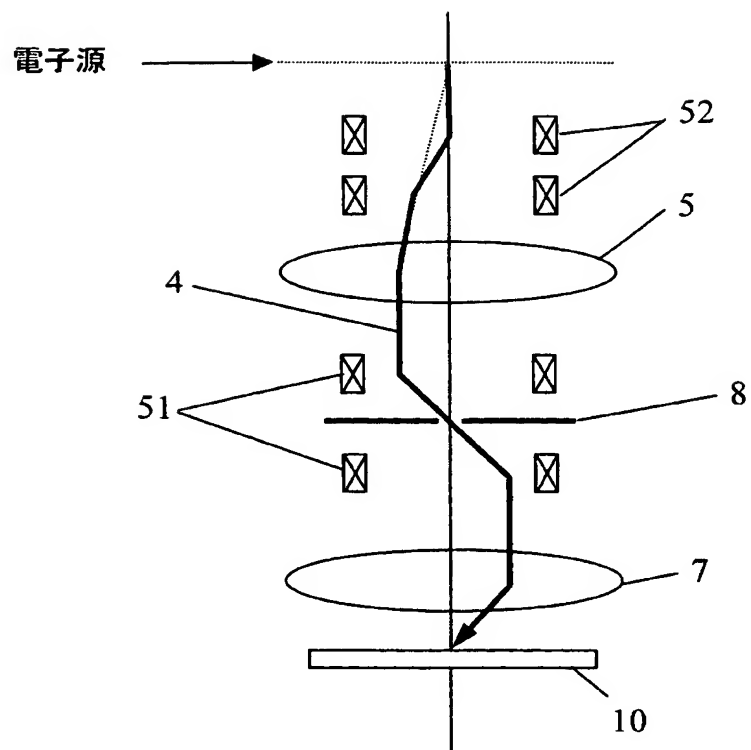
【図 13】



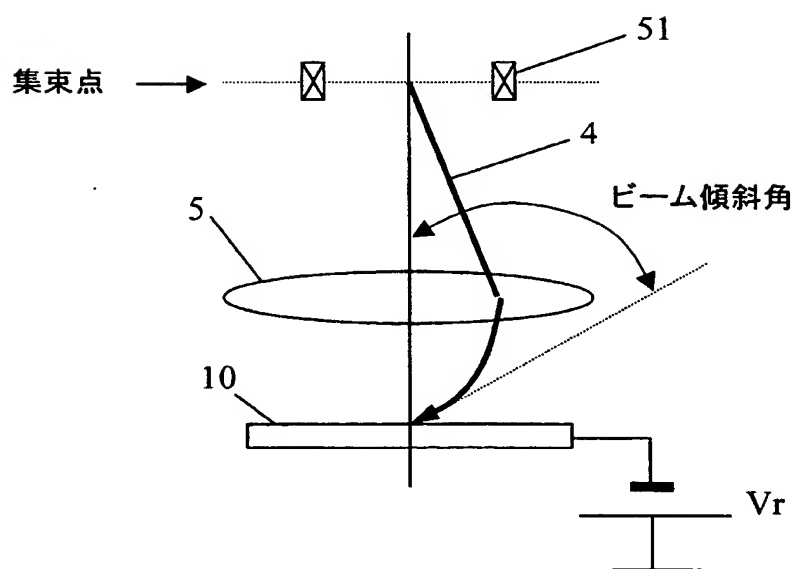
【図 14】



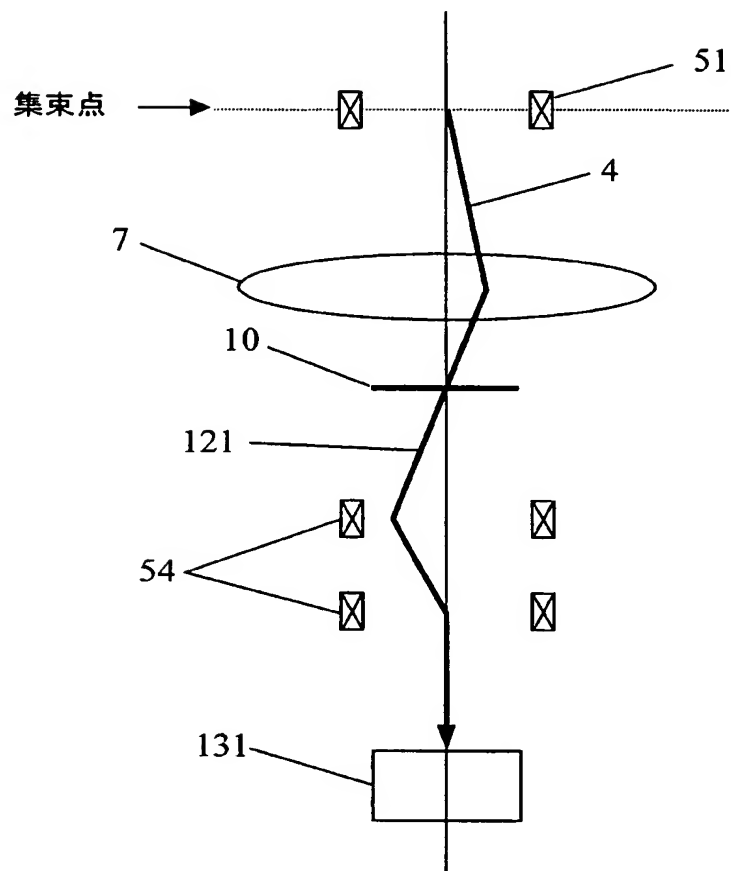
【図 15】



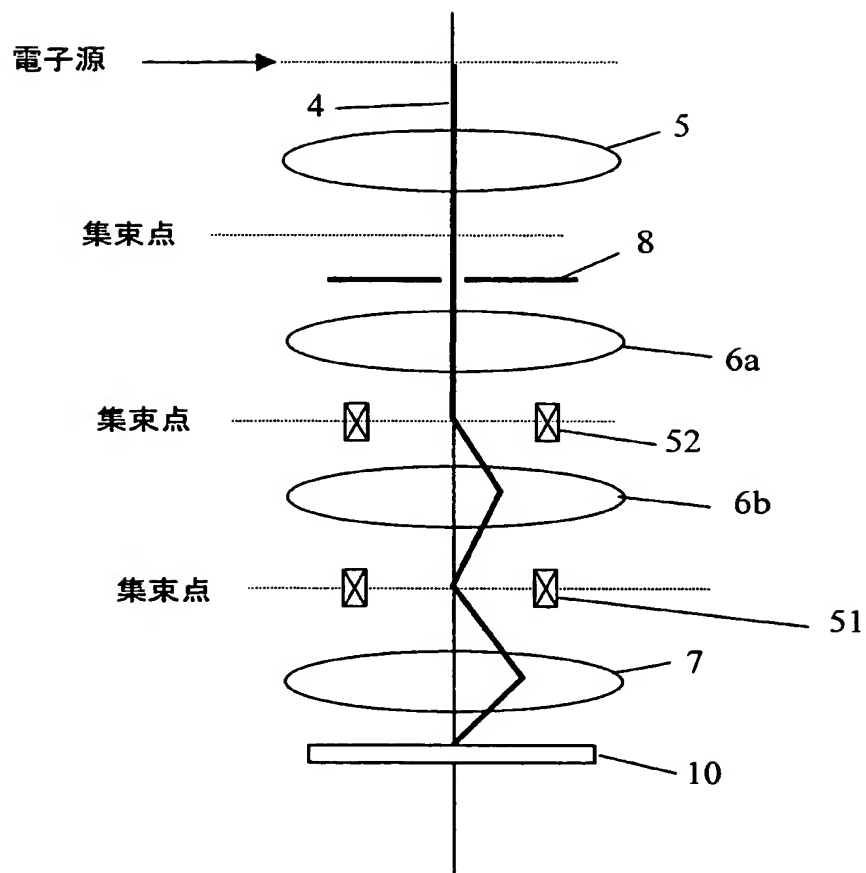
【図 16】



【図 17】



【図 18】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 試料に対してビームを傾斜しても分解能低下の少ない荷電粒子線装置を提供する。

【解決手段】 複数のレンズ 6, 7 に対して一次ビーム 4 の軌道を軸外に通し、その軸外軌道を制御することにより、ビーム傾斜時に対物レンズ 7 で発生する収差を他のレンズ 6 の収差でキャンセルする手段を備えた。

【選択図】 図 4

特願 2 0 0 2 - 2 6 5 8 4 2

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[5 0 1 3 8 7 8 3 9]

1. 変更年月日

2 0 0 1 年 1 0 月 3 日

[変更理由]

新規登録

住 所

東京都港区西新橋一丁目 2 4 番 1 4 号

氏 名

株式会社日立ハイテクノロジーズ